CNC超精密非球面研削盤の開発と ぜい性材料の高精度三次元加工*

鈴木 弘**

Development of CNC Ultra Precision Aspheric Grinder and 3-dimensional High Precise Machining of Brittle Materials / Hiroshi SUZUKI

Key words: CNC ultraprecision aspheric grinder, pickup lens of CD disk, grinding of molds, very small cutting of depth, optics for short wave length light, brittle material, silicon carbide

1. はじめに

情報化は想像を絶する速度であらゆる分野に浸透している。これらは情報の授受、伝送、処理、蓄積、表示のためのハードウェアとソフトウェアにより構成されるシステムにより支えられている。

ハードウェアのキーテクノロジーの一つとして光技術が挙げられ、情報の媒体は電子から光に置き換えられつつある。わが国では、まず家庭電化製品の中にその用途が見い出された。コンパクトディスクプレーヤ、レーザーディスクなどがその例であり、その結果口径数mmの非球面レンズの量産によるコストダウンが必要となった。

一方、マイクロプロセッサ、半導体メモリーなどのLSIは光描画技術に基づく微細加工によっている。特に半導体メモリーは記憶密度が4年ごとに倍増するという技術進歩の急激な分野であり、次世代のVLSIでは高速化、大容量化のため、エキシマレーザ、軟X線、シンクロトロン放射光を光源とする超微細加工の研究が進行している。このためには、短波長光学素子が不可欠であるとされている。

本文では非球面レンズ金型加工用に開発されたAHN 10形CNC超精密非球面加工機とさらに短波長光学素子の超精密研削加工について述べる。

2. 光学素子の形状と材料

光学素子の材料は光学特性により制限される。当面

の非球面加工の対象であるコンパクトディスク、レーザーディスクなどは可視光が用いられている。

次の1Mbit以上の記憶密度を目指すVLSIの 패턴の線幅はサブミクロンになるとされ、リソグラフィの光源は紫外領域となる。さらに大容量の半導体素子の超微細加工には、軟X線、シンクロトロン放射光が光源として考えられている。

電磁波としての光の波長は可視光は0.7~0.4 μm であり、紫外線の光源として期待されているのはKrFエキシマレーザの0.248 μm 、ArFエキシマレーザの0.193 μm である。軟X線領域では0.01 μm 以下である。

レンズなどの光学素子の材料は光の波長により透過特性が異なり、用途が限定される。図1に各種材料の紫外域の透過率¹⁾を示す。光学ガラスはエキシマレーザ用には使用できず、合成石英(SiO_2)、ホタル石(CaF_2)が適しているといえる。

図1 各種材料の紫外領域での透過率

* 原稿受付 平成2年2月23日

** 正会員 豊田工機(株) (刈谷市朝日町1-1)

図2 各種材料の熱伝導度と線膨張係数の関係

X線領域になると、物質に対する屈折率がほとんど1に近くなり、スネルの法則により全反射の臨界角は1°以下になり、透過結像系は構成できない。このために反射面にほとんど接する入射角による斜入射反射鏡が開発されている。

また、波長が短くなれば、光子エネルギーは大きな関係にあり、大出力のエキシマレーザあるいは軟X線が照射される光学素子は表面の傷などにより吸収が起これば、温度上昇による熱ひずみ、熱損傷、光学特性の劣化が起これる。発熱による変形を少なくするためには、局所的に温度が上がらないように熱伝導率 K が大きく、線膨張係数 α が小さいことが重要であり、 K/α が大きいことが望ましい。破壊まで考えると、熱伝導度の絶対値が大きいことが必要である。図2²⁾に各種材料の熱伝導度と線膨張係数の関係を示す。ガラス類は熱伝導度が小さいので不適である。炭化けい素(SiC)は K/α も大きく、熱伝導度がダイヤモンドの次に大きいので、金属よりも優れた材料といえる。

これまででは、球面の加工には創成法があったので、可視光用のレンズやミラーに対しては球面に対応し、素子を何枚か組み合わせて収差を補償し、要求性能を満たしてきた。しかし、高性能化、軽薄短小化、軽量化、コストダウンのニーズが高まり、非球面光学素子が注目されることとなった。コンパクトディスクなどのピックアップ

レンズはレンズの非球面化により高性能化し、レンズ枚数を削減し、プラスチックを用いることにより質量を減らし応答性を高める改良が進められた。これはレーザ干渉計による位置フィードバックによるCNC超精密非球面加工機の開発が大いに貢献している。

X線を光源とする描画装置の光学素子は、前述のごとくレンズ系は用いられず、斜入射ミラーでなければならない。(誘電体多層膜をコートした直入射系も研究されているが、)斜入射ミラーはWolterタイプ、シリンドリカルあるいはトロイダルミラーが代表的である。

軟金属とプラスチックの超精密切削加工が実用化されている現在、次に研究開発が求められるのは、軸対象非球面金型に代表されるステンレス鋼などの超精密加工機械である。さらに将来に向けてはぜい性材料の超精密加工であり、3次元自由曲面から構成される短波長光学素子の超精密加工技術の確立であろう。

3. CNC超精密非球面加工機械

これまで工作物の取付け取外し以外は1台の機械システムですべての作業を実行できる自律的超精密加工機械が望まれていた。このようなニーズにこたえて図3に示すAHP10形CNC超精密非球面加工機は、NCプログラムの作成、砥石のツルージング・ドレッシング、超精密切削・研削、オンマシン計測、NCデータの補正などをオペレータの指示により実行できることを目標として、比較的小径の非球面を対象として開発した。

超精密研削加工では、形状精度と表面粗さの向上、加工変質層の低減が重要である。形状精度は工具軌跡の工作物への転写精度である。形状創成は超精密位置決めに基づく数値制御により達せられる。難削材の研削加工では、研削抵抗がダイヤモンド切削に比べて非

図3 AHP10型CNC超精密非球面加工機

図4 同時3軸制御による非球面加工の原理図

常に大きいので、微細切込みによるマイクロ研削でなければならない。そのためには加工機械は高剛性である必要がある。加工変質層を低減するためには、サブミクロンの微細切込みによるのが望ましい。表面粗さは微細なダイヤモンドの砥粒の砥石により達成する。

カップ砥石を用いてエッジ研削ができるように、機械は以下のように構成した。エッジの一点で加工するために図4に示すようにX, Z, B同時3軸制御が必要である。曲率半径が小さい凹面を砥石の干渉がないように加工するため、砥石軸を工作物軸に対して45°傾斜させている。砥石の加工点はB軸の回転中心に一致するように設定する必要がある、手で高さ、X, Z位置の調節ができる三軸調整台が備えられている。これにより砥石の先端を顕微鏡により拡大してTV画面に写し、目視でB軸上にミクロンオーダーで位置決めができる。X, Z軸により、砥石の切削点を位置決めし、所要の非球面形状に沿って研削する。研削点の移動中絶えず砥石軸が加工面の法線方向を向くようB軸テーブルを制御する。この方式は砥石の成形精度が無視できることが優れている。

X, Z軸の直線案内面には減衰性に優れ、剛性の高い油静圧軸受が用いられている。テーブルの位置決め精度は、工作物の形状精度に直接影響するので重要である。本機では、CNC装置からのNC指令により、サーボモータを回転し、それに直結したボールねじにより直線運動に変換してテーブルの位置決めをする。測定範囲が長く、高分解能のレーザ干渉計を用いて、テーブルの位置決め誤差を検出し、フルクローズドループ制御により、 $0.01\mu\text{m}$ /パルスの位置決め分解能が達成されている。

B軸の回転テーブルは油静圧軸受で支持され、ダイレクトドライブのサーボモータで直接駆動される。テーブルの割出し誤差は高分解能のロータリエンコー

ダで検出され、1.3秒/パルスの割出し分解能が得られている。

研削に適した砥石の周速度を得るには、砥石軸は高速回転しなければならないが、軸受での摩擦による発熱による熱変位は形状精度以下でなければならない。切削に比べて大きな研削抵抗により変位しないためには、軸受は高剛性である必要がある。これらの条件を満たす軸受として静圧空気軸受が用いられた。回転は空気タービンを用い、最大100 000 rpmを可能とし、駆動源による振動を排除している。

工作物主軸は回転数は低い、大きな法線研削抵抗を受けるから、スラスト剛性の大きな空気軸受が採用された。軸の回転はダイレクトドライブモータを組み込み、直接駆動し、回転精度を $0.02\mu\text{m}$ 以下としている。

このように機械要素を超精密に構成しても、全く機械の誤差を無くすことは困難である。また、加工中の砥石摩耗も発生する。さらに、機械設置環境も不変ではない。このようにして発生する誤差を補償するために、加工形状誤差のオンマシン計測、砥石のツルueイング、NCデータの自動プログラミング、NCデータ補正を1台の機械システムにて可能とした。

工作物の加工を行い、加工精度を測定し、精度以内であれば加工を終了するが、誤差が大きければ、再現性のある誤差はNCデータを補正して再加工する必要がある。この測定のために、工作物を着脱すると、現存の工作物保持具では元の状態に戻すことは困難であり、通常は荒加工から仕上げ加工までを再び繰り返さなければならない。そこで、本機ではオンマシン計測によりこの無駄を排除している。工作物主軸は加工時には水平に設定されているが、測定時には加工面が上を向くように旋回機構を設けており、機械に内蔵された形状測定器によりオンマシン計測を可能としている。オンマシン計測はこの機械の非常に優れた特徴と考えられる。

交換した砥石形状誤差、摩耗した砥石の修正も、砥石を外すことなく機械上に装備されたツルueイング装置により可能とした。砥石外形と端面をオシレーションさせながらツルueイングできる。切込みはX軸スライドを用いて、 $0.01\mu\text{m}$ 単位で行える。

表1に主な機械仕様をまとめて示す。最大加工径は $\phi 100\text{mm}$ である。この機械では砥石をダイヤモンドバイトに置き換えれば、超精密切削加工もできるように、刃物台も備えている。

加工形状を与えるNCプログラムはパソコンを用いたプログラミング装置により作成される。形状は非

表1 CNC超精密非球面加工機の主な仕様

項 目	仕 様
最大加工径 (mm)	φ100
主軸回転速度 (rpm)	300~3 000
X 軸移動距離 (mm)	250
Z 軸移動距離 (mm)	200
最小移動単位 (X, Z) (μm/パルス)	0.01
最小移動単位 (B) (秒/パルス)	1.3
砥石軸回転速度 (rpm)	最大 100 000

球面を表す多項式の係数を入力し、CRT画面との対話方式により、容易に点群に直される。

以上述べたごとくこのAHN 10 CNC超精密非球面加工機の豊富な機能により高生産性で、超精密な加工が未熟練者にも可能となったといえる。

4. 金 型 加 工

従来の金型はダイヤモンド切削が前提であったことから、基材に金型用ステンレス鋼を用い、非晶質の無電解ニッケルめっきをし超精密旋盤により非球面に仕上げていた。超精密非球面加工機の開発により、高硬度材料の研削加工が可能となったことから、金型の素材に超硬合金、セラミックスなどが用いられるようになり、寿命の延長とコストダウンがもたらされた。

ここでは超硬合金のレーザディスク用ピックアップレンズ金型の加工例を示す。工作物直径5mmの放物面である。#1500 レジンボンドダイヤモンド砥石を用いて研削加工したところ、良好な加工精度が得られた。機上の形状測定器の計測では、図5に示すように形状加工精度は $0.06\mu\text{m}$ であった。タリステップによる表面粗さは $0.025\mu\text{m} R_{\text{max}}$ であり、うねりは $0.035\mu\text{m}$ であった。この加工精度は研削加工で金型として耐える精度に仕上げられることを実証した。これより、金型加工の工程の大幅な削減を可能とし、生産性の向上をもたらすとともに、コストダウンを果たした。

5. 短波長用光学素子の研削加工

前述のごとく現時点では短波長光学素子の材料は合

測定機：フォームタリサーフ

図5 非球面金型の形状加工精度

図6 SiCの研削面のノマルスキー顕微鏡写真

図7 SiC研削面の表面粗さ

表2 短波長光学素子材料の物性値

項 目	材 料	炭化けい素 (CVD)SiC	合成石英 SiO ₂	ホタル石 CaF ₂
硬さ (HK)		2 800~3 500	590~620	158
ヤング率 (GPa)		382.2	76.2	75.8
熱伝導度 (W/mK)		200~250	1.2	9.7
線膨張係数 (°C ⁻¹)		4.4×10^{-6}	0.5×10^{-6}	24×10^{-6}
融点 (°C)		2 800 以上	1 660	1 402

成石英、ホタル石、炭化けい素に絞られている。いずれもぜい性材料である。しかも用途は限られており、これまで余り超精密加工の対象にならなかった材料であり、加工データはほとんど明らかにされていない。そこで表面粗さを評価特性として比較テストした。

SiをCIPした基板にSiCを50μm CVDした素材をレジンボンドの#3000の砥石を用い、エッジ研削により平面を加工した。研削面のノマルスキー顕微鏡写真を図6に示す。条痕は整って見え、良好に研削されていることがわかる。タリステップによる表面粗さの測定結果は図7のようであり、5nm rmsが得られた。

合成石英とCaF₂をSiCと同一条件で研削した表面のノマルスキー顕微鏡観察の結果を相対比較するとSiC>CaF₂>合成石英の順であった。用いた材料の物性値を比較したのが表2である。表の物性値と研削性との関連を見ると研削は材料除去加工であるから、研削性は硬度との関連があると考えられるが、結果は逆であった。熱伝導度の大小の順と研削結果とが一致している。これより

短波長光学素子材料の研削性を向上するには、研削熱の発生を少なくし、効果的に冷却することが重要であると考えられる。

短波長光学素子材料の超精密研削加工では、以下の事項に留意することが重要である。

- (1) 延性モード研削のために、サブミクロンの微細切込みができること。
- (2) nm 以下の表面粗さを達成するためには、 μm オーダの粒径の砥石を用いること。
- (3) 砥石面からの砥粒の突出し量を数 μm とするドレッシング・ツルーイングを可能とすること。
- (4) (2), (3) の条件で砥粒の保持力が研削抵抗に耐えられること。
- (5) 研削時の発熱を速やかに排除すること。

6. 自由曲面の超精密加工

軸対称非球面では形状精度が $0.1\ \mu\text{m}$ 、表面粗さが nm の加工精度の実用的な超精密研削加工機が開発され、基礎的な研究開発の段階から脱しつつあるといえよう。しかし、口径の大きな素子の加工にはスケールアップにかかわる課題は今後も解決してゆかねばならないであろう。

世界的に見ても、軟 X 線、シンクロトロン放射光を対象とした光学素子の形状創成技術に関しては未開発の状態にあると言わざるをえない。斜入射ミラー、セグメントミラー、長焦点軸外しミラーは大きなものが多い。例えば、高エネルギー物理学研究所のフォトンファクトリーで使用中の SiC ミラーの一覧³⁾に見られるトロイダルミラーでは $450 \times 150 \times 65\ \text{mm}$ のものがあり、当面最大加工範囲が 1 m の加工機械の開発が待望されている。これらの三次元自由曲面の加工の

ためには、少なくとも同時 5 軸制御の大型超精密研削機械が必要である。形状精度を達成するためには、前述の条件に加えて、工具を微細切込み量を保ちながら曲面に沿って運動させるために、高剛性で低熱変位の機械の開発が必要である。加工距離が長く、砥石の摩擦も大きいことから、オンマシン計測し、コンピュータによる補正機能を備えなければならない。

このような仕様を満たす超精密三次元自由曲面研削加工機が開発が平成 5 年を目指して、工業技術院大型プロジェクト「超先端加工システムの研究開発」において推進されている。

7. おわりに

光学素子を中心にぜい性材料の超精密加工について述べたが、超精密三次元自由曲面研削加工機が期待されており、強力に開発を進めることが望まれる。超精密加工技術は広汎な応用分野をもち、21 世紀を目指した技術開発には不可欠な基盤技術である。

本文の短波長光学素子の研削加工の部分は新エネルギー・産業技術総合開発機構の大型工業技術研究開発「超先端加工システムの研究開発」の一環としてなされたものである。

文 献

- 1) 加納一郎ほか：注入同期レーザと単色レンズで光学系をまず試作，日経マイクロデバイス，2月号（1987）113.
- 2) 宮田威男：超精密加工技術と短波長光学部品への応用，応用物理，58，6（1989）844.
- 3) 佐藤 繁：放射光線源と VUV・X 線光学系，「X 線光学における超精密技術の現状と将来」シンポジウムテキスト，精密工学会，（1987.7）23.